

开关阵列调控的串并联型柔性互联装备及其容错运行机制

王翔, 才志远*, 王思成, 赵国亮, 慕小斌, 袁佩娥, 王思尧, 桑晓魁

(先进输电技术全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

Switch Matrix-controlled Series-parallel Hybrid Flexible Interconnection Equipment and Its Fault-tolerant Mechanism

WANG Xiang, CAI Zhiyuan*, WANG Sicheng, ZHAO Guoliang, MU Xiaobin,
YUAN Pei'e, WANG Siyao, SANG Xiaokui

(State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (China Electric Power Research Institute),
Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Flexible interconnection plays a pivotal role in enhancing both the reliability and operational flexibility of distribution networks. Current power electronic interconnection devices are hindered by high costs and maintenance complexities, while traditional phase-shifting interconnection devices exhibit limited accuracy and slow response times. To address these issues, this paper proposes the Switch matrix-controlled series-parallel hybrid transformer (SCHT), a novel approach that utilizes a switch matrix-based control strategy. The SCHT enables the flexible selection of switch matrix topologies and types, thereby accommodating the distinct technical, economic, and regulatory demands of various operational scenarios. The study develops a comprehensive two-port equivalent circuit and mathematical model for the SCHT, offering a clear understanding of its regulation mechanism. By capitalizing on the redundancy afforded by multiple switch configurations within a single operational mode, this paper introduces a fault-tolerant operational strategy to mitigate the impact of failures in individual switching devices. The accuracy of the proposed model and the effectiveness of the fault-tolerant mechanism are validated through simulations and a 10 kV prototype testing.

KEY WORDS: flexible interconnection; switch matrix; fault-tolerant operation; equivalent circuit; available domain

摘要: 柔性互联是提高配电网供电可靠性和运行灵活性的重

要手段。当前, 电力电子型互联装备成本高、运维难, 传统移相器类互联装备精度差、响应慢。针对此问题, 提出一种开关阵列调控的串并联混合型柔性互联装备(switch-matrix-controlled series-parallel hybrid transformer, SCHT), 可通过灵活选择开关阵列的拓扑结构和开关类型, 兼顾不同场景对于互联装备技术经济性和调节性能的差异化需求; 然后, 构建 SCHT 的两端口等效电路和数学模型, 明晰其调节作用机理, 利用其同一档位下具备多种开关组合方式的冗余优势, 提出在单一开关器件故障下装备的容错运行机制, 并通过仿真分析和真型试验, 验证所提出数学模型正确性和容错运行机制的可行性。

关键词: 柔性互联; 开关阵列; 容错运行; 等效电路; 可用域

0 引言

随着分布式光伏等新能源、电动汽车等新型负荷及各类型储能的大规模广泛接入, 配电网逐渐由单纯的电能分配网络, 向源网荷储的综合承载网络转变, 对配电网的供电可靠性、运行灵活性提出了越来越高的要求^[1-3]。配电网形态由传统的辐射状向广泛联络的网络状发展^[3]。相较传统的断路器刚性互联形式, 柔性互联技术可以实现配电网线路间的无冲击互联及互联电网潮流的灵活调节^[4], 示范应用日益增多。

依据实现原理, 柔性互联技术可分为电力电子式和电磁式两种技术路线^[5]。电力电子式柔性互联装备基于“全控型电力电子器件”可实现柔性连续控制, 主要包括统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)、智能软开关(soft open point,

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (5400-202317546A-3-2-ZN)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5400-202317546A-3-2-ZN).

SOP)、静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)等。其中, UPFC 一般由两组共用直流母线的电压源换流器组成, 分别以并联和串联方式接入电网, 可同时调节线路阻抗、控制电压幅值与相角, 灵活调节有功与无功功率, 优化电网运行状态^[6]; SOP 一般基于背靠背电压源换流器构建, 实现互联线路间潮流双向调节和分配^[7-8]; SSSC 通过在线路中串入一个与线路电流相位垂直的电压量, 可以灵活控制线路中传输的有功功率^[9-10]。但在实际配电系统的应用运行中, 电力电子式柔性互联装备越来越暴露出技术经济性不足等诸多问题, 推广应用存在困难^[11-12]。电磁式柔性互联装备基于电磁感应原理实现柔性离散调节, 主要包括移相变压器和 Sen 变压器(Sen transformer, ST)等。移相变压器利用本相相电压与相邻两相线电压存在 90° 相位差的特性, 通过获取相邻两相线电压后经一定变比叠加至本相线路中, 实现电压幅值和相位的调节; Sen 变压器利用三相电压间 120° 相位差特性, 同时获取经变换后不同幅值的三相电压, 串联后叠加至线路中, 实现了叠加电压的四象限灵活调节^[12]。但由于传统电磁式互联装置普遍采用有载调节开关作为调节机构, 无法实现跨档位调节, 导致响应速度受限, 难以满足互联系统运行调节的实时性要求^[13-14]。

在柔性互联装备本体故障处理方面, 对于电力电子式柔性互联装备, 由于电力电子器件抗冲击电压和电流能力不足, 当某一开关器件故障时, 需在极短时间内(μs 级)闭锁故障模块^[15-17], 只能通过增加备用换流模块提高装备容错运行能力^[18-21], 而这会进一步抬高本就昂贵的设备成本; 对于采用有载调节开关的电磁式柔性互联装备, 当有载调节开关发生某一开关触头短路或断路时, 装备将丧失调节功能, 需通过本体保护切除两侧开关, 退出装备运行^[22-24], 导致原本互联的配电线路重新解列为辐射运行, 降低了配电网的供电可靠性。

基于此, 针对目前柔性互联装备技术经济性与调节性能和容错运行能力的矛盾, 本文基于电磁式柔性调节原理, 提出开关阵列调控的串并联混合型柔性互联装备 (switch-matrix-controlled series-parallel hybrid transformer, SCHT)。首先, 介绍其拓扑构成, 明晰电压调节原理; 然后, 基于变压器互阻抗模型原理构建 SCHT 的数学模型和两端口等效电路, 识别 SCHT 容错运行的关键因素; 之后,

针对 SCHT 单一开关器件故障, 开展容错运行特性分析, 提出容错运行控制策略; 最后, 通过 Matlab/Simulink 搭建柔性互联系统模型, 采用某电网实际参数, 通过数学模型、仿真分析和真型试验交叉比对, 验证所提柔性互联装备数学模型的正确性及装备反应于开关器件故障的容错运行机制可行性。

1 SCHT 简介

1.1 拓扑构成

SCHT 主要由并联变压器、串联变压器、调节机构 3 部分构成, 如图 1 所示。

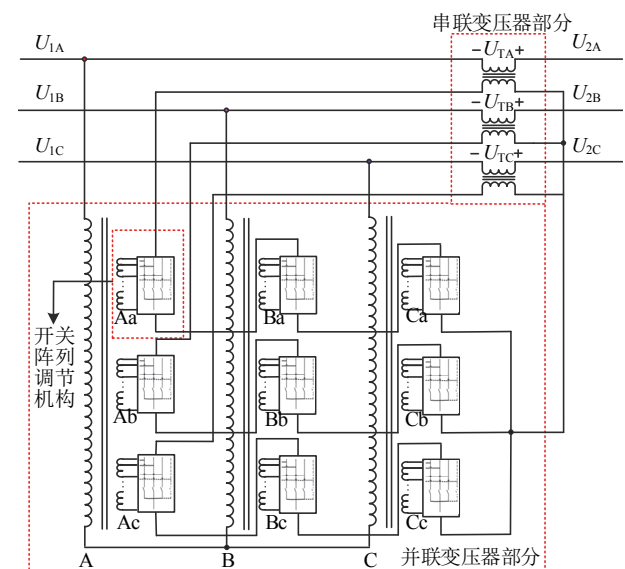


图 1 开关阵列调控的串并联型柔性互联装备拓扑

Fig. 1 Topology of SCHT

每相并联变压器均为一个四绕组变压器, 原边一个绕组, 负责获取系统相电压作为励磁; 副边 3 组绕组(以 A 相为例即为 Aa、Ab、Ac, B、C 相同理), 每组绕组均带有相同数量的分接头, 将其分为匝数不同的多个分段。

每相串联变压器均为一个两绕组变压器, 负责将三相并联变压器组合出的电压矢量经一定的变比 T , 串联叠加至系统各相线路中, 一方面发挥柔性互联装备的系统功能, 另一方面将调节机构与高压系统隔离, 降低调节机构耐压要求。

如图 2 所示, 调节机构是一个由开关单元组成的开关阵列, 为多桥臂 H 桥型拓扑结构。通过开关阵列中开关单元的导通与关断, 构建出并联变压器副边绕组的不同组合, 实现调节功能。其中, 桥臂数量、并联变压器副边绕组分段数及各段匝数比例关系等, 可根据装备所应用的配电网系统需求、调

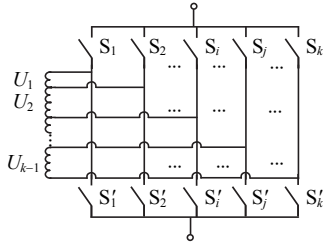


图2 k桥臂型开关阵列调节机构

Fig. 2 Switch matrix of k -leg topology

节精度及技术经济性要求等选取。调节机构采用的开关单元，可根据系统对装置的响应速度、过流能力、耐压能力等要求选取半控型开关器件、有载切换开关、快速机械开关等，满足不同场景对技术经济性和调节性能的差异化需求。

$$\mathbf{U}_T = \begin{bmatrix} 0 & U_1 & U_1 + U_2 & \cdots & \sum_{e=0}^{k-1} U_e \\ -U_1 & 0 & U_2 & \cdots & -U_1 + \sum_{e=0}^{k-1} U_e \\ -U_1 - U_2 & -U_2 & 0 & \cdots & -(U_1 + U_2) + \sum_{e=0}^{k-1} U_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\sum_{e=0}^{k-1} U_e & U_1 - \sum_{e=0}^{k-1} U_e & (U_1 + U_2) - \sum_{e=0}^{k-1} U_e & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

以A相调节模块Aa为例，当该调节模块开关阵列上半桥臂 S_{iA} 导通、下半桥臂 S'_{jA} 导通时，模块Aa的输出电压为

$$U_{Aa}(S_{iA}, S'_{jA}) = \sum_{l=0}^{j-1} U_l - \sum_{h=0}^{i-1} U_h \quad (2)$$

式中： $i, j \in \{1, 2, \dots, k\}$ ； $U_0 = 0$ 。

同理可得 U_{Ab} 、 U_{Ac} 的表达式。考虑到SCHT正常运行下的三相对称性，B、C相的补偿电压与A相补偿电压合成原理相同。

由此可得SCHT的电压调节关系为

$$\begin{cases} U_{2A} = U_{1A} + U_{TA} = U_{1A} + T \cdot (U_{Aa} + U_{Ba} + U_{Ca}) \\ U_{2B} = U_{1B} + U_{TB} = U_{1B} + T \cdot (U_{Bb} + U_{Cb} + U_{Ab}) \\ U_{2C} = U_{1C} + U_{TC} = U_{1C} + T \cdot (U_{Cc} + U_{Ac} + U_{Bc}) \end{cases} \quad (3)$$

式中： U_{Aa} 、 U_{Ab} 、 U_{Ac} 、 $\dots$ 、 U_{Cc} 分别为SCHT中并联变压器副边调节机构输出到串联变压器的电压； T 为串联变压器的变比。叠加电压的向量关系如图3所示。

2 SCHT的数学模型和等效电路

为避免绕组电压矢量叠加过程中引入的原、副边绕组间复杂的电磁耦合折算关系，本文将结合互

1.2 基本原理

下文具体阐述SCHT实现电压调节的基本原理。SCHT的调节机构采用 k 桥臂型开关阵列，将并联变压器副边绕组按一定比例分为 $k-1$ 个分段，各分段电压分别为 U_1 、 U_2 、 $\dots$ 、 U_{k-1} ，如图2所示。

调节模块输出电压与开关单元组合状态的关系如式(1)所示。其中，矩阵中元素所在的行数 i 代表开关阵列中上半桥臂的 S_i 开关单元导通，所在的列数 j 代表开关阵列中下半桥臂的 S'_j 导通。例如，当开关阵列中上半桥臂 S_1 导通，下半桥臂 S'_2 导通时，调节模块输出电压为第1行第2列的值 U_1 。

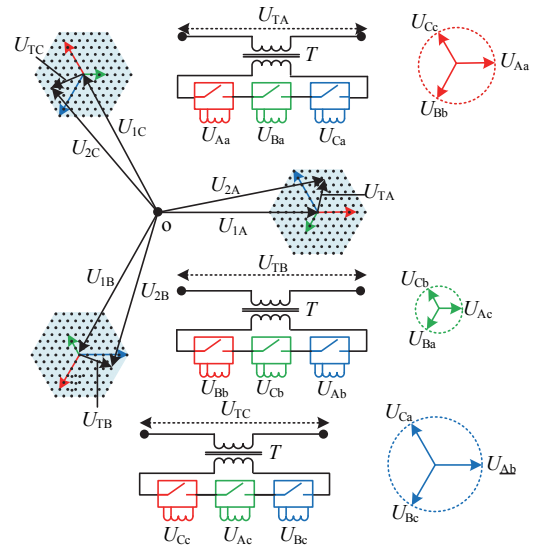


图3 SCHT组合电压

Fig. 3 Combined voltage of SCHT

感方法^[25]和T型等值电路方法对SCHT进行建模。

2.1 SCHT的端口电压模型

根据图1所示SCHT拓扑结构，构建SCHT装备的六端口等效模型，如图4所示，其中： i_{A1} 、 i_{B1} 、 i_{C1} 和 i_{A2} 、 i_{B2} 、 i_{C2} 分别为表示两侧互联馈线流入装备的三相端口电流； u_{A1} 、 u_{B1} 、 u_{C1} 和 u_{A2} 、 u_{B2} 、 u_{C2} 分别对应装备两侧的端口电压； u_0 为并联变压器原

边中性点的对地电压值，在三相对称情况下， u_0 恒为 0。

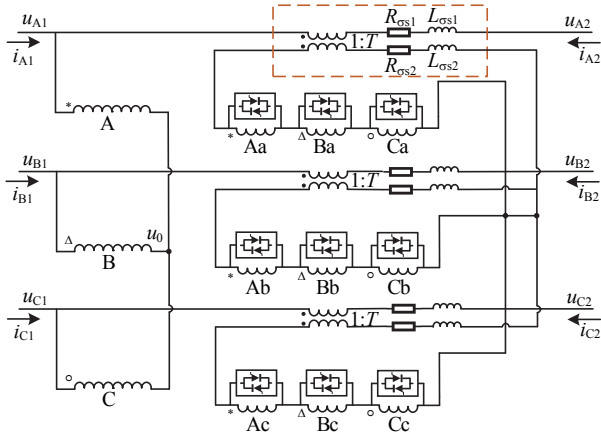


图 4 SCHT 装备互感模型

Fig. 4 Mutual inductance model of SCHT

以 A 相为例，互联装置并联变压器侧的电压-电流关系方程可表示为

$$u_{\text{SCHT-A}} = L_{\text{SCHT-A}} \frac{di_{\text{SCHT-A}}}{dt} + R_{\text{SCHT-A}} i_{\text{SCHT-A}} \quad (4)$$

式中 $u_{\text{SCHT-A}}$ 、 $i_{\text{SCHT-A}}$ 、 $L_{\text{SCHT-A}}$ 、 $R_{\text{SCHT-A}}$ 分别为并联变压器各相绕组的电压矩阵、电流矩阵、电感矩阵和电阻矩阵：

$$\begin{cases} u_{\text{SCHT-A}} = [u_{A1}(t) - u_0(t) & u_{Aa}(t) & u_{Ab}(t) & u_{Ac}(t)]^T \\ i_{\text{SCHT-A}} = [i_{A1}(t) + i_{A2}(t) & i_{A2}(t) & i_{B2}(t) & i_{C2}(t)]^T \\ L_{\text{SCHT-A}} = \begin{bmatrix} L_A & -\vec{M}_{A-Aa} & -\vec{M}_{A-Ab} & -\vec{M}_{A-Ac} \\ -\vec{M}_{A-Aa} & L_{Aa} & \vec{M}_{Aa-Ab} & \vec{M}_{Aa-Ac} \\ -\vec{M}_{A-Ab} & \vec{M}_{Aa-Ab} & L_{Ab} & \vec{M}_{Ab-Ac} \\ -\vec{M}_{A-Ac} & \vec{M}_{Aa-Ac} & \vec{M}_{Ab-Ac} & L_{Ac} \end{bmatrix} \\ R_{\text{SCHT-A}} = \text{diag}[R_A & R_{Aa} & R_{Ab} & R_{Ac}] \end{cases}$$

式中： L_m 、 R_m 分别为绕组 m 的自感值及电阻值； M_{m-n} 为绕组 m 与 n 之间的互感值 ($m, n \in \{A, Aa, Ab, Ac\}$)。值得注意的是，由上文所述，并联变压器的副边绕组存在负档位，代表绕组极性方向可变，因此 $L_{\text{SCHT-A}}$ 矩阵中的互感均表示为矢量形式，具体含义如式(5)所示。

$$\vec{M}_{m-n} = D_{m-n} M_{m-n}, \quad D_{m-n} \in \{-1, 1\} \quad (5)$$

式中 D_{m-n} 为绕组 m 和 n 的相对极性系数，其取值由两者相对于初始状态下参考绕组极性方向的乘积确定。

考虑到三相对称情况，装置并联侧三相间的电感和电阻数矩阵可视为相同，为方便三相端口的统一表示，将参数简化为

$$\begin{cases} [L_A & L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac}] = [L_P & L_{S1} & L_{S2} & L_{S3}] \\ [R_A & R_{Aa} & R_{Ab} & R_{Ac}] = [R_P & R_{S1} & R_{S2} & R_{S3}] \\ [\vec{M}_{A-Aa} & \vec{M}_{A-Ab} & \vec{M}_{A-Ac}] = [\vec{M}_{PS1} & \vec{M}_{PS2} & \vec{M}_{PS3}] \\ [\vec{M}_{Aa-Ab} & \vec{M}_{Aa-Ac} & \vec{M}_{Ab-Ac}] = [\vec{M}_{S12} & \vec{M}_{S13} & \vec{M}_{S23}] \\ u_0(t) = 0 \end{cases}$$

同理，在三相对称条件下，SCHT 装备的串联侧变压器可建模为图 4 虚线框中所示 T 型等效电路，装置两侧 A 相端口间的电压关系可表示为

$$\begin{aligned} u_{A2}(t) &= u_{A1}(t) + i_{A2}(t) \cdot R_{\sigma s1} + L_{\sigma s1} \frac{di_{A2}(t)}{dt} + \\ &T(T \cdot i_{A2}(t) \cdot R_{\sigma s2} + L_{\sigma s2} \frac{d(T \cdot i_{A2}(t))}{dt}) + \\ &u_{Aa}(t) + u_{Ba}(t) + u_{Ca}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

式中： T 为串联变压器的变比； $R_{\sigma s1}$ 、 $L_{\sigma s1}$ 、 $R_{\sigma s2}$ 、 $L_{\sigma s2}$ 分别为串联变压器原边和副边的漏阻抗。将式(4)中各项电压值代入式(6)并做拉式变换后，同理推广至 B、C 相电压-电流关系方程，可得 SCHT 装置在三相对称下的六端口电压-电流关系方程为

$$\begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ABC11} & Z_{ABC12} \\ Z_{ABC21} & Z_{ABC22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中各项符号矩阵具体如下：

$$\begin{aligned} U_1(s) &= [U_{A1}(s) \quad U_{B1}(s) \quad U_{C1}(s)]^T \\ U_2(s) &= [U_{A2}(s) \quad U_{B2}(s) \quad U_{C2}(s)]^T \\ I_1(s) &= [I_{A1}(s) \quad I_{B1}(s) \quad I_{C1}(s)]^T \\ I_2(s) &= [I_{A2}(s) \quad I_{B2}(s) \quad I_{C2}(s)]^T \\ Z_{ABC11} &= sL_P + R_P \\ Z_{ABC12} &= sL_P - T\vec{M}_{PS} + R_P \\ Z_{ABC21} &= sL_P - T\vec{M}_{PS}^T + R_P \\ Z_{ABC22} &= sL_{PS} - T\vec{M}_S + R_{PS} \\ L_P &= \text{diag}[L_P \quad L_P \quad L_P] \\ L_{PS} &= \text{diag}[L_{PS} \quad L_{PS} \quad L_{PS}] \\ R_P &= \text{diag}[R_P \quad R_P \quad R_P] \\ R_{PS} &= \text{diag}[R_{PS} \quad R_{PS} \quad R_{PS}] \\ \vec{M}_{PS} &= \begin{bmatrix} \vec{M}_{PS1} & \vec{M}_{PS2} & \vec{M}_{PS3} \\ \vec{M}_{PS3} & \vec{M}_{PS1} & \vec{M}_{PS2} \\ \vec{M}_{PS2} & \vec{M}_{PS3} & \vec{M}_{PS1} \end{bmatrix} \\ \vec{M}_S &= \begin{bmatrix} 2\vec{M}_{PS1} & T\vec{M}_S - \vec{M}_{PS23} & T\vec{M}_S - \vec{M}_{PS23} \\ T\vec{M}_S - \vec{M}_{PS23} & 2\vec{M}_{PS1} & T\vec{M}_S - \vec{M}_{PS23} \\ T\vec{M}_S - \vec{M}_{PS23} & T\vec{M}_S - \vec{M}_{PS23} & 2\vec{M}_{PS1} \end{bmatrix} \\ L_{PS} &= L_P + L_{\sigma s1} + T^2(L_{S1} + L_{S2} + L_{S3} + L_{\sigma s2}) \\ R_{PS} &= R_P + R_{\sigma s1} + T^2(R_{S1} + R_{S2} + R_{S3} + R_{\sigma s2}) \\ \vec{M}_S &= \vec{M}_{S12} + \vec{M}_{S13} + \vec{M}_{S23} \\ \vec{M}_{PS23} &= \vec{M}_{PS2} + \vec{M}_{PS3} \end{aligned}$$

2.2 SCHT 的等效电路

根据上文 SCHT 的调节机理可知,式(7)中,各单相端口电压与三相电流之间均存在耦合关系。考虑到装置在正常运行条件下处于三相对称状态,可通过对六端口电压-电流方程进行线性代换,进而得到单相端口的电压-电流等效模型。本文采用 Clarke 变换方法对三相系统实现解耦,定义式(7)中阻抗矩阵为 $\mathbf{Z}_{ABC}$, 其具体变换方程如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\alpha\beta 01}(s) \\ \mathbf{U}_{\alpha\beta 02}(s) \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\alpha\beta 01}(s) \\ \mathbf{I}_{\alpha\beta 02}(s) \end{bmatrix} \\ \mathbf{Z}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \mathbf{Z}_{ABC} \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix}^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{C}$ 为等幅值 Clarke 变换矩阵; $\mathbf{Z}_{\alpha\beta 0}$ 为 $\alpha\beta$ 坐标系下的 SCHT 装备六端口阻抗矩阵,其余变量矩阵定义如下:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{\alpha\beta 01}(s) = [U_{\alpha 1}(s) \ U_{\beta 1}(s) \ U_{01}(s)]^T \\ \mathbf{U}_{\alpha\beta 02}(s) = [U_{\alpha 2}(s) \ U_{\beta 2}(s) \ U_{02}(s)]^T \\ \mathbf{I}_{\alpha\beta 01}(s) = [I_{\alpha 1}(s) \ I_{\beta 1}(s) \ I_{01}(s)]^T \\ \mathbf{I}_{\alpha\beta 02}(s) = [I_{\alpha 2}(s) \ I_{\beta 2}(s) \ I_{02}(s)]^T \end{cases}$$

假设三相电压电流均可用余弦表示,代入等幅值 Clarke 变换矩阵 $\mathbf{C}$ 可得:

$$\begin{cases} V_{\alpha} = V_A - \frac{1}{2}V_B - \frac{1}{2}V_C = V_m \cos \omega t \\ I_{\alpha} = I_A - \frac{1}{2}I_B - \frac{1}{2}I_C = I_m \cos \omega t \\ I_{\beta} = -\frac{\sqrt{3}}{2}I_B + \frac{\sqrt{3}}{2}I_C = I_m \sin \omega t \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)进行拉普拉斯变换后可得:

$$\begin{cases} V_{\alpha}(s) = V_A(s) \\ I_{\alpha}(s) = I_A(s) \\ sI_{\beta}(s) = \omega I_{\alpha}(s) \end{cases} \quad (10)$$

电压电流的 α 分量可视为 SCHT 装备单相电压电流量,且阻抗矩阵中 α 与 β 电流分量可实现代换解耦。因此,令 $s=j\omega$ (此处 j 为虚数单位),并将式(7)和(10)代入式(8),可得 SCHT 的单相端口电压-电流方程为

$$\begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中:

$$\begin{cases} Z_{11} = R_p + j\omega L_p \\ Z_{12} = R_p + \frac{\sqrt{3}}{2}\omega T(\bar{M}_{PS2} - \bar{M}_{PS3}) + \\ \quad j\omega[L_p - T(\bar{M}_{PS1} - \frac{1}{2}\bar{M}_{PS2} - \frac{1}{2}\bar{M}_{PS3})] \\ Z_{21} = R_p + \frac{\sqrt{3}}{2}\omega T(\bar{M}_{PS3} - \bar{M}_{PS2}) + \\ \quad j\omega[L_p - T(\bar{M}_{PS1} - \frac{1}{2}\bar{M}_{PS2} - \frac{1}{2}\bar{M}_{PS3})] \\ Z_{22} = R_{PS} + j\omega[L_{PS} - T^2\bar{M}_S - \\ \quad T(2\bar{M}_{PS1} - \bar{M}_{PS2} - \bar{M}_{PS3})] \end{cases} \quad (12)$$

上述端口模型可以准确描述装备的理论外特性,但实际运行中,SCHT 是通过调节机构的档位改变发挥调节功能,而非直接改变电感值。为方便理论计算,并确保模型能够准确反映实际运行状态,本文将从励磁角度建立电感与档位间的关系表达,以简化式(11)。

假设 SCHT 中并联变压器的励磁电抗为 X_m ,原边漏抗为 $X_{\sigma 1}$,副边 3 个调节机构的串联总漏抗为 $X_{\sigma 2}$ 。以 A 相为例,调节机构 Aa、Ab、Ac 接入回路的匝数比分别为 n_a 、 n_b 、 n_c 。考虑原副边的漏抗远小于励磁电抗,式(12)中的电感参数可表示为

$$\begin{cases} \omega L_p = X_m + X_{\sigma 1} \\ \omega L_{PS} = X_m(1 + n_a^2 + n_b^2 + n_c^2) + \\ \quad X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2} + X_{\sigma s1} + X_{\sigma s2} \\ \omega \bar{M}_{PSi} = D_{P-Si}\omega M_{P-Si} = D_{P-Si}n_iX_m, \quad i \in \{a, b, c\} \\ \omega \bar{M}_S = \sum_{i,j \in \{a, b, c\}, i \neq j} D_{P-Si}D_{P-Sj}n_in_jX_m \end{cases} \quad (13)$$

进一步简化式(13),将方向参数 D 与匝数比 n_i 合并,可得:

$$D_{P-Si}n_i = \bar{n}_i \in \{-3n_0, -2n_0, \dots, 3n_0\} \quad (14)$$

式中: $\bar{n}_i$ 为 A 相第 i 个调节机构的档位; n_0 为调节机构可接入回路的单位匝数比。

根据式(11),单相 SCHT 在系统中可视为一个双端口网络,因此 SCHT 在三相对称情况下的等效电路如图 5 所示。

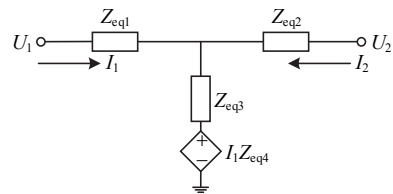


图5 SCHT 装备等效电路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of equivalent circuit of SCHT

将式(13)、(14)代入式(11)，可得等效电路各项参数表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{eq1} = Z_{11} - Z_{21} = \frac{\sqrt{3}}{2}(\bar{n}_c - \bar{n}_b)TX_m + \\ \quad j(\bar{n}_a - \frac{1}{2}\bar{n}_b - \frac{1}{2}\bar{n}_c)TX_m \\ Z_{eq2} = Z_{22} - Z_{12} = R_{ps} - R_p + \frac{\sqrt{3}}{2}(\bar{n}_b - \bar{n}_c) \cdot \\ \quad TX_m + j\{[(\bar{n}_a^2 + \bar{n}_b^2 + \bar{n}_c^2 - \bar{n}_a\bar{n}_b - \bar{n}_b\bar{n}_c - \\ \quad \bar{n}_a\bar{n}_c)T + (-\bar{n}_a + \frac{1}{2}\bar{n}_b + \frac{1}{2}\bar{n}_c)]TX_m + \\ \quad X_{os1} + X_{\sigma1} + T^2(X_{os2} + X_{\sigma2})\} \\ Z_{eq3} = Z_{12} = R_p + \frac{\sqrt{3}}{2}(\bar{n}_b - \bar{n}_c)TX_m + \\ \quad j[-\bar{n}_a + \frac{1}{2}\bar{n}_b + \frac{1}{2}\bar{n}_c + 1)TX_m + X_{\sigma1}] \\ Z_{eq4} = Z_{21} - Z_{12} = \sqrt{3}(\bar{n}_c - \bar{n}_b)TX_m \end{array} \right. \quad (15)$$

可知，该等效电路由 4 个等效阻抗和 1 个等效流控电压源构成，等效阻抗值由装备三相调节机构档位 $\bar{n}_a$ 、 $\bar{n}_b$ 、 $\bar{n}_c$ 共同决定，SCHT 的潮流调节功能基于“阻抗网络-受控源”协同作用实现。

3 本体故障下 SCHT 的容错运行

3.1 柔性互联装备本体故障及保护配置

按照柔性互联装备在系统运行过程中可能发生的故障位置、故障类型和故障特点，可以将其划分为两个保护分区：变压器本体保护区和调节机构保护区^[22]。变压器本体保护区主要反应于变压器本体的绕组相间短路、匝间短路、绕组接地等故障，配置了绕组过流保护、瓦斯保护、油面温控保护等保护类型。调节机构保护区，主要反应于调节机构的开关元件短路、断路等故障类型，配置了相关过流、过压等保护。具体保护配置如表 1 所示。

表 1 柔性互联装备本体保护配置

Table 1 Body protection configuration of SCHT

保护分区	保护配置
变压器保护区	电流差动保护
	绕组过流保护
	瓦斯保护
	油面温控保护
调节机构保护区	过流保护
	过压保护

对于变压器本体的严重故障，因短路电流过大，设备无法承受，需要保护动作断开装备两侧开关，彻底隔离故障。而对于局部、轻微的故障，如

变压器轻微匝间短路、单一开关器件故障，可以考虑实现装备的容错运行。对于前者，可反应于变压器本体的瓦斯保护，在未触发重瓦斯动作的情况下，保持互联装备的在网运行，并及时采取检修策略。对于后者，如果采用本文提出的开关阵列型调节机构，可以根据系统需求，进行开关阵列的拓扑重构，保证装置在网运行、发挥系统功能。本文将着重讨论开关阵列单一开关器件故障下的容错运行方法。

3.2 SCHT 的冗余度

下文中将以反并联晶闸管作为开关器件，3 桥臂型调节机构拓扑举例，阐述 SCHT 装备的冗余运行能力。调节机构拓扑如图 6 所示，在正常工作模式下，各导通一只上桥臂的晶闸管 S_i 和下桥臂的晶闸管 S'_j 。

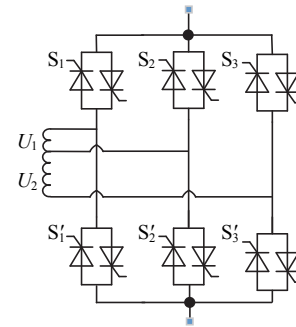


图 6 反并联晶闸管构成的三桥臂型调节机构

Fig. 6 Three-leg regulating mechanism composed of anti-parallel thyristors

具体导通状态及对应模块输出电压值如矩阵 U_T 所示。

$$U_T = \begin{bmatrix} 0 & U_1 & U_1 + U_2 \\ U_1 & 0 & U_2 \\ -(U_1 + U_2) & -U_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

在单相单模块输出层面，根据式(1)、(2)和(16)，对于单一调节机构来说，任意满足 $i=j$ 关系的 S_i 、 S'_j 组合方式均可得到 0 电压档位，当桥臂数 $k=3$ 时，0 电压档位存在 3 种组合方式。

在三相三模块组合层面，根据图 7，系统中各相叠加电压输出均由并联变压器三相电压矢量组合后得到，由于三相对称性，每个组合输出电压矢量点存在数量不同冗余组合方式。各个同心六边形上，组合输出电压矢量模值 U_{TA} 与组合输出电压矢量冗余度 r 之间关系如式(17)所示。其中 U_1 为调节机构的最小可调电压量。

$$|U_{TA}| = [(2k+1)-r]|U_1| \quad (17)$$

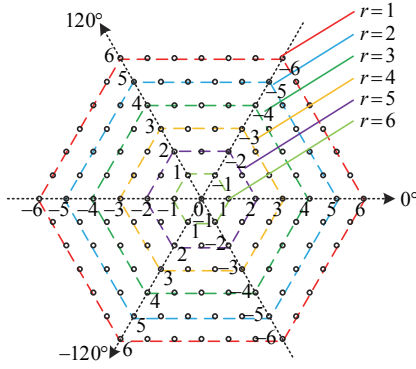


图7 SCHT 冗余度示意

Fig. 7 Schematic diagram of SCHT redundancy

以A相为例,目标电压矢量冗余度如图7所示。

综上,柔性互联装备在单相单模块输出电压和三相三模块组合电压两个层面均存在冗余可用档位。对于某一目标电压矢量,调节机构Aa、Ba、Ca存在多种开关单元组合方式,由式(15)可知,在各档位漏抗均远小于励磁电抗的条件下,这些组合方式可互为备用冗余,提高装置可靠性。

3.3 本体故障下的容错运行机理

3.3.1 SCHT 的可用域

根据上文分析可知,在某单一开关器件故障时,对于冗余度 $r>1$ 的档位,总能找到另外的开关器件组合方式实现等效替换,装备可继续在网运行,且系统无感;对于冗余度 $r=1$ 的档位(图7最外圈),无法找到能够完全等效的其他开关器件组合方式,但可以在系统调节精度允许的情况下,调整至临近档位,继续承担一定的系统功能。下文结合图8所示两个定义,进行详细分析。

定义1 狭义可用域。对于装置当前运行档位 $(\vec{n}_{a1}, \vec{n}_{b1}, \vec{n}_{c1})$ 对应的开关器件组合方式 $(S_{iAa}, S'_{jAa}, S_{iBa}, S'_{jBa}, S_{iCa}, S'_{jCa})$,若存在任何一个不同的开关器件组合方式构成的档位 $(\vec{n}_{a2}, \vec{n}_{b2}, \vec{n}_{c2})$,使得SCHT等效电路中各个等效阻抗 Z_{eq1} 、 Z_{eq2} 、 Z_{eq3} 、 Z_{eq4} 分别相等,则档位 $(\vec{n}_{a2}, \vec{n}_{b2}, \vec{n}_{c2})$ 与 $(\vec{n}_{a1}, \vec{n}_{b1}, \vec{n}_{c1})$ 互为狭义可用档位,所有狭义可用档位构成了当前档位的狭义

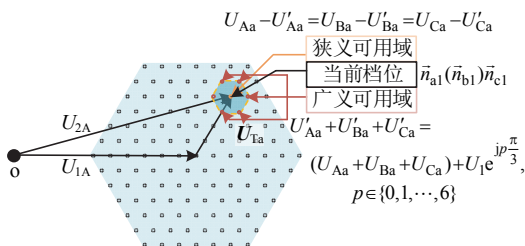


图8 SCHT 狭/广义可用域示意图

Fig. 8 Narrow/broad-sense available domain of SCHT

可用域。

根据柔性互联装备等效模型式(15)推导可知,狭义可用档位之间需满足:

$$\begin{cases} \vec{n}_{a1} - \frac{1}{2}\vec{n}_{b1} - \frac{1}{2}\vec{n}_{c1} = \vec{n}_{a2} - \frac{1}{2}\vec{n}_{b2} - \frac{1}{2}\vec{n}_{c2} \\ \vec{n}_{b1} - \vec{n}_{c1} = \vec{n}_{b2} - \vec{n}_{c2} \end{cases} \quad (18)$$

将式(18)代入式(2)可得,互为狭义可用的档位间输出电压 (U_{Aa}, U_{Ba}, U_{Ca}) 和 $(U'_{Aa}, U'_{Ba}, U'_{Ca})$ 满足如下电压矢量关系:

$$U_{Aa} - U'_{Aa} = U_{Ba} - U'_{Ba} = U_{Ca} - U'_{Ca} \quad (19)$$

定义2 广义可用域。对于装置当前运行档位 $(\vec{n}_{a1}, \vec{n}_{b1}, \vec{n}_{c1})$ 对应的开关器件组合方式 $(S_{iAa}, S'_{jAa}, S_{iBa}, S'_{jBa}, S_{iCa}, S'_{jCa})$,若存在任何一个不同的开关器件组合方式构成的档位 $(\vec{n}_{a3}, \vec{n}_{b3}, \vec{n}_{c3})$,使得满足式(20),则档位 $(\vec{n}_{a3}, \vec{n}_{b3}, \vec{n}_{c3})$ 为 $(\vec{n}_{a1}, \vec{n}_{b1}, \vec{n}_{c1})$ 的广义可用档位,当前档位下的所有广义可用档位构成了当前档位的广义可用域。

$$U'_{Aa} + U'_{Ba} + U'_{Ca} = (U_{Aa} + U_{Ba} + U_{Ca}) + U_l e^{jp\frac{\pi}{3}} \quad (20)$$

式中 $p \in \{0, 1, \dots, 6\}$ 。

3.3.2 可用域计算方法

结合式(2)与(15),装置输出电压矢量 U_{Tar} 与各调节机构组合档位电压关系为

$$U_{Tar} = [1 \quad j] \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A(S_{iAa}, S'_{jAa}) \\ U_B(S_{iBa}, S'_{jBa}) \\ U_C(S_{iCa}, S'_{jCa}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

令式(2)中:

$$\begin{cases} \sum_{l=0}^{j-1} U_l = U_{jA} \\ \sum_{h=0}^{i-1} U_h = U_{iA} \end{cases} \quad (22)$$

则:

$$\begin{bmatrix} U_A(S_{iA}, S'_{jA}) \\ U_B(S_{iB}, S'_{jB}) \\ U_C(S_{iC}, S'_{jC}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{jA} - U_{iA} \\ U_{jB} - U_{iB} \\ U_{jC} - U_{iC} \end{bmatrix} \quad (23)$$

在系统要求柔性互联装备输出的某一目标电压矢量下,柔性互联装备的可用域问题转化为一个2约束条件 $(\text{Re}[U_{Tar}], \text{Im}[U_{Tar}])$ 、6组合变量 $(U_{jA}, U_{iA}, U_{jB}, U_{iB}, U_{jC}, U_{iC})$ 的整数规划问题。

其目标函数为

$$\arg \min \{ \bar{U}_{\text{Tar}} - [(U_{jA} - U_{iA}) - \frac{1}{2}(U_{jB} - U_{iB}) - \frac{1}{2}(U_{jC} - U_{iC})] + j[\frac{\sqrt{3}}{2}(U_{jC} - U_{iC}) - \frac{\sqrt{3}}{2}(U_{jB} - U_{iB})] \} \quad (24)$$

装备不同工况下存在组合变量取值范围的不同, 具体如下。

1) 装备正常运行, 组合变量为 6 个。各开关器件均正常工作, S_i 和 S'_j 可取范围均为 $\{1, 2, 3\}$, 组合变量取值范围为

$$U_{jA}, U_{iA}, U_{jB}, U_{iB}, U_{jC}, U_{iC} \in \{0, U_1, U_1 + U_2\} \quad (25)$$

2) 某一开关器件故障短路, 组合变量为 5 个。当某一模块调节机构开关器件因故障强制导通时, 可通过调整与之串联的其他模块绕组组合方式, 使装备重新进入狭义或广义可用域。例如, 当 S_{iA} 击穿强制导通时, 各组合变量取值范围为

$$\begin{cases} U_{iA} = \begin{cases} 0, & i = 1 \\ U_1, & i = 2 \\ U_1 + U_2, & i = 3 \end{cases} \\ U_{jA}, U_{jB}, U_{iB}, U_{jC}, U_{iC} \in \{0, U_1, U_1 + U_2\} \end{cases} \quad (26)$$

3) 某一开关器件故障断路, 组合变量为 6 个。当某一模块调节机构开关器件因故障强制断路时, 故障器件对应组合变量的取值范围发生了变化。以 S_{iA} 损坏导致断路为例, 此时各组合变量取值范围为

$$\begin{cases} U_{jA}, U_{jB}, U_{iB}, U_{jC}, U_{iC} \in \{0, U_1, U_1 + U_2\} \\ U_{iA} \in \{0, U_1, U_1 + U_2\} - \{\sum_{h=0}^{i-1} U_h\} \end{cases} \quad (27)$$

通过剪枝搜索减少搜索空间, 并采用循环添加阻塞子句(blocking clause)方法限制求解器重复访问同一已知解, 从而可求出单一开关器件短路或断路故障情况下的可用域。

3.4 SCHT 的容错控制

下文阐述 SCHT 在单一开关器件失效情况下的容错控制方法。

假设系统潮流转移指令为 $S_{\text{ref}} = P_{\text{ref}} + jQ_{\text{ref}}$ 。当 SCHT 运行档位为 $(\bar{n}_a, \bar{n}_b, \bar{n}_c)$, 对应调节机构开关器件状态为 $(S_{iA}, S'_{jA}, S_{iB}, S'_{jB}, S_{iC}, S'_{jC})$ 时, 转移潮流为 $S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij}$, 则转移潮流偏差率为 $\Delta S = \sqrt{(P_{ij} - P_{\text{ref}})^2 + (Q_{ij} - Q_{\text{ref}})^2} / \sqrt{P_{\text{ref}}^2 + Q_{\text{ref}}^2}$ 。假设系统潮流转移偏差率容忍度为 ΔS_{lim} , 此时若发生了某开关器件故障, SCHT 的容错控制流程如图 9 所示。

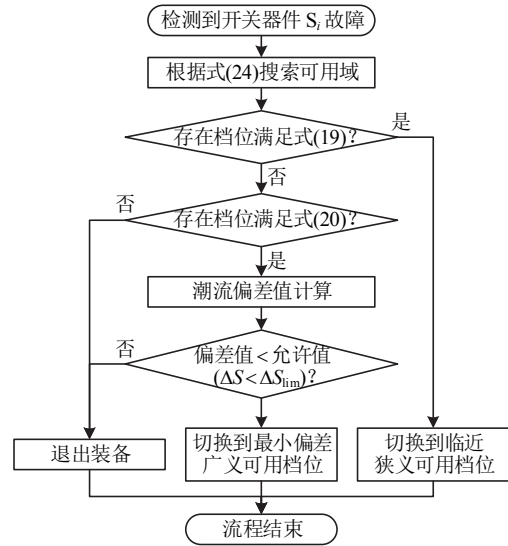


图 9 SCHT 的容错控制策略流程

Fig. 9 The fault-tolerant control strategy of SCHT

装备控制系统检测到开关器件 S_i 故障后, 进行可用域检索, 首先判断是否存在狭义可用域, 如果存在, 则切换至临近狭义可用档位后继续运行; 如果不存在, 则判断是否存在广义可用域, 如果不存在则装备退出运行, 如果存在则针对每个广义可用档位进行潮流偏差计算, 并与系统潮流偏差容忍度 ΔS_{lim} 进行比较。如果某一广义可用档位下潮流偏差值在系统潮流偏差容忍度范围内, 则档位切换至该广义可用档位继续运行, 若不满足, 则装置退出运行。

4 试验验证

为验证本文提出的 SCHT 数学模型的正确性及所提出容错运行方法的可行性, 利用 Matlab/Simulink 软件进行系统和装备模型搭建, 系统接线图如图 10 所示。



图 10 含 SCHT 的双端 10 kV 系统

Fig. 10 Double-ended 10 kV system containing SCHT

4.1 模型参数设置

仿真模型及数学模型参数设置如表 2、3 所示。

4.2 仿真实验验证

首先, 通过仿真模型和数学模型分别计算 SCHT 在各个主要运行档位下对系统的有功、无功潮流转移情况, 验证所构建数学模型的准确性。

由表 4 可知, 数学模型的计算结果与仿真结果吻合良好, 潮流转移偏差率在 0.75%~1.81%之间,

表 2 10 kV 配电网互联系统模型参数

Table 2 Model parameters of 10 kV distribution network interconnection system

参数	数值
系统 S ₁ 电压 U ₁ /kV	10∠0°
系统 S ₂ 电压 U ₂ /kV	10∠5°
线路单位长度等效电阻 r/(Ω/km)	0.065
线路单位长度等效电感 l/(mH/km)	0.291
系统 A 到互联点线路长度 L ₁ /km	6
系统 B 到互联点线路长度 L ₂ /km	8

表 3 SCHT 装备主要参数

Table 3 Model parameters of SCHT

参数	数值
并联变压器高压绕组额定电压 U _{TP_1N} /kV	10
并联变压器调节绕组额定电压 U _{TP_2N} /kV	0.12+0.24
串联变压器高压绕组额定电压 U _{TS_1N} /kV	1.44
串联变压器低压绕组额定电压 U _{TS_2N} /kV	0.72
并联变压器高压绕组电阻 R _{TP_1} /mΩ	450
并联变压器移相绕组电阻 R _{TP_2} /mΩ	0.195+0.778
并联变压器高压绕组漏感 L _{TP_σ1} /mH	17.2
并联变压器低压绕组漏感 L _{TP_σ2} /mH	0.007 43+0.002 97
调节机构输出基准变比 n ₀	0.12/(10/√3)

表 4 仿真模型与数学模型计算对比

Table 4 Calculation comparison between simulation model and mathematical model

档位	仿真模型 P _S /MW	仿真模型 Q _S /Mvar	数学模型 P _M /MW	数学模型 Q _M /Mvar	模型偏 差率/%
(0, 0, 0)	-0.466	0.166	-0.460	0.163	1.38
(n ₀ , n ₀ , n ₀)	-0.466	0.166	-0.460	0.163	1.36
(2n ₀ , -1n ₀ , 0)	-0.672	-0.053	-0.663	-0.060	1.66
(2n ₀ , -2n ₀ , -n ₀)	-0.717	-0.158	-0.711	-0.164	1.22
(-2n ₀ , n ₀ , 2n ₀)	-0.431	0.548	-0.423	0.552	1.36
(2n ₀ , n ₀ , n ₀)	-0.508	0.063	-0.500	0.058	1.81
(-n ₀ , -2n ₀ , -2n ₀)	-0.508	0.063	-0.500	0.058	1.78
(-2n ₀ , -3n ₀ , -3n ₀)	-0.508	0.063	-0.500	0.058	1.72
(3n ₀ , -3n ₀ , -2n ₀)	-0.820	-0.366	-0.814	-0.369	0.75

验证了本文构建的 SCHT 数学模型在稳态潮流分析时的正确性。

然后，以档位(n₀, 0, 0)为例，对比分析 SCHT 在狭义可用域和广义可用域下的潮流转移情况，验证 SCHT 的容错运行能力。

计算(n₀, 0, 0)档位的狭义、广义可用域下的有功、无功功率，并将所得潮流偏差率数据绘制曲线图如图 11 所示。由图可知，SCHT 在狭义可用域下潮流转移偏差率在 1%以下；在广义可用域下潮流转移偏差率在 10%以下，说明 SCHT 具备较强的容错运行能力，本文所提出的单一开关器件故障下

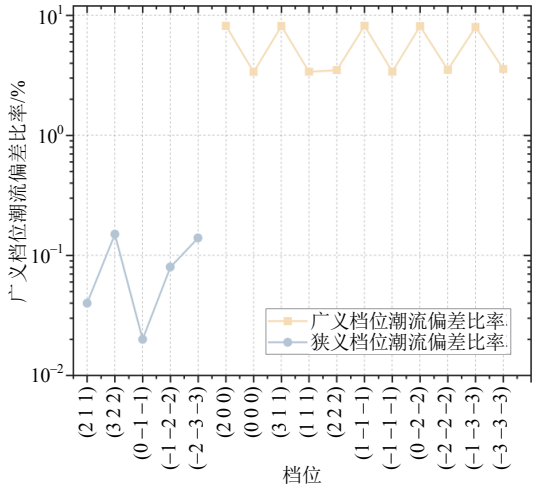


图 11 档位(n₀, 0, 0)狭/广义可用域下潮流偏差率(ΔS)

Fig. 11 Power flow deviation rate under narrow/broad available domain in tap (n₀, 0, 0)

SCHT 的容错运行机制是可行的。

4.3 真型试验验证

面向某 10 kV 配电网合环需求构建了双端 10 kV 互联系统试验平台，如图 12 所示。

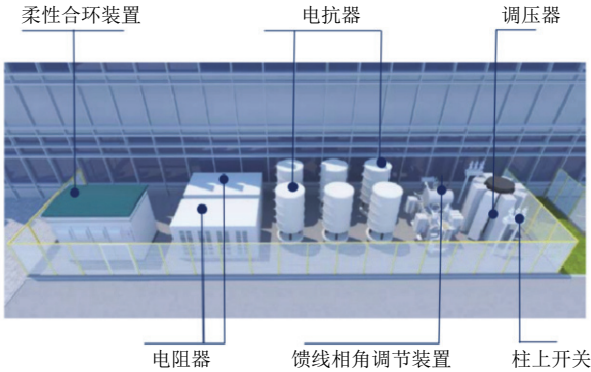


图 12 10 kV 互联系统试验平台

Fig. 12 10 kV interconnected system test platform

样机为自主研发的 10 kV/3 MVA 三桥臂型 SCHT，如图 13 所示。



图 13 SCHT 型柔性互联装备样机

Fig. 13 Engineering prototype of SCHT

基于试验平台对 SCHT 样机的潮流转移功能、狭义可用切换、广义可用切换等功能进行测试

验证。

1) 潮流转移指令为 $P_{\text{ref}} = -0.24 \text{ MW}$ 、 $Q_{\text{ref}} = -0.5 \text{ Mvar}$ 、 $\Delta S_{\text{lim}} = 15\%$ 。

在该潮流转移指令下，装置需运行在 $(n_0, 0, 0)$ 档位。当开关器件 S_1 发生故障导致常开， $(n_0, 0, 0)$ 档位无法保持时，根据柔性互联装备本体故障容错控制策略，切换至狭义可用档位 $(2n_0, n_0, n_0)$ ，柔性互联装备在档位切换前后的潮流转移变化情况，波形如图 14 所示。可见，装置容错运行后，有功潮流转移偏差 0.004 MW ，无功潮流转移偏差 0.002 Mvar ，潮流转移偏差比率 0.63% ，满足系统要求，可以在网运行。

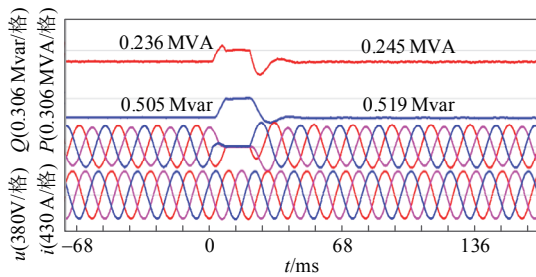


图 14 档位 $(n_0, 0, 0)$ 切换至档位 $(2n_0, n_0, n_0)$

Fig. 14 Shift from $(n_0, 0, 0)$ to $(2n_0, n_0, n_0)$

2) 潮流转移指令为 $P_{\text{ref}} = -1 \text{ MW}$ 、 $Q_{\text{ref}} = -2.5 \text{ Mvar}$ 、 $\Delta S_{\text{lim}} = 15\%$ 。

在该潮流转移指令下，装置需运行在 $(3n_0, -3n_0, -3n_0)$ 档位。0 时刻， S_1 发生故障导致常开，原档位无法保持。根据柔性互联装备本体故障容错控制策略，在无狭义可用档位情况下，经广义可用域下潮流偏差计算比较后，需切换至广义可用档位 $(2n_0, -3n_0, -3n_0)$ 。SCHT 装备在档位切换前后的潮流转移变化情况，波形如图 15 所示。可见，装置容错运行后，有功潮流转移偏差 0.067 MW ，无功潮流转移偏差 0.14 Mvar ，潮流转移偏差比率 6.4% 。满足系统要求，可以在网运行。

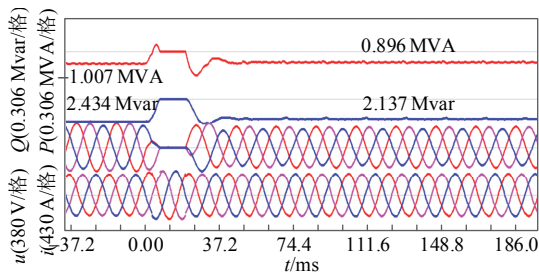


图 15 档位 $(3n_0, -3n_0, -3n_0)$ 切换至档位 $(2n_0, -3n_0, -3n_0)$

Fig. 15 Shift from $(3n_0, -3n_0, -3n_0)$ to $(2n_0, -3n_0, -3n_0)$

5 结论

本文提出了一种开关阵列调控的电磁型柔性互联装备(SCHT)，分析了其拓扑构成和输出电压基本原理，推导得出了 SCHT 的等效电路，提出 SCHT 的容错运行机理和调节方法，通过理论分析、仿真验证和试验测试，得出以下结论：

1) 基于多绕组变压器互感模型推导所得出的 SCHT 型柔性互联装备等效模型，可以很精确地反映在系统三相平衡运行情况下的设备外特性。经过仿真验证，模型计算结果的潮流转移偏差率在 $0.75\% \sim 1.81\%$ 之间，说明所得 SCHT 的等效模型精度较高，适用于系统稳态下的分析计算。

2) SCHT 在开关器件组合层面和调节模块组合层面存在冗余度，使得柔性互联装备在单一开关器件因故障短路或断路的情况下均存在备用可用档位，可以容错运行。通过仿真分析和试验验证，对于狭义可用档位，SCHT 的潮流转移的偏差率在 1% 以下，仍可以很好地完成潮流调节功能；对于广义可用档位，SCHT 的潮流转移偏差率在 10% 以下，在满足系统潮流转移偏差率要求的情况下，可以在网运行，继续承担系统调节功能。

参考文献

- [1] 陈维江, 靳晓凌, 吴鸣, 等. 双碳目标下我国配电网形态快速演进的思考[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6811-6817.
CHEN Weijiang, JIN Xiaoling, WU Ming, et al. Thinking on the rapid evolution of distribution network form under the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6811-6817(in Chinese).
- [2] 舒印彪, 汤涌, 张正陵, 等. 新型配电网构建及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6721-6732.
SHU Yinbiao, TANG Yong, ZHANG Zhengling, et al. Construction of new distribution network and its key technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6721-6732(in Chinese).
- [3] 盛万兴, 刘科研, 李昭, 等. 新型配电系统形态演化与安全高效运行方法综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 1-18.
SHENG Wanxing, LIU Keyan, LI Zhao, et al. Review of basic theory and methods of morphological evolution and safe & efficient operation of new distribution system [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 1-18(in Chinese).
- [4] 王鹤, 李石强, 于华楠, 等. 多端柔性直流配电网故障

- 识别及定位研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(24): 9563-9579.
- WANG He, LI Shiqiang, YU Huanan, et al. A review of fault identification and localization research in multi-terminal flexible DC distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(24): 9563-9579(in Chinese).
- [5] 陈维江, 赵国亮, 邓占锋, 等. 柔性交流输电技术(一): 基本概念与技术谱系[J]. 高电压技术, 2025, 51(8): 3733-3739.
- CHEN Weijiang, ZHAO Guoliang, DENG Zhanfeng, et al. Flexible AC transmission & distribution technology (I): basic concepts and technology genealogy[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 3733-3739(in Chinese).
- [6] 冯欣, 张建文, 周剑桥, 等. 串并联型多端口配电网柔性互联开关[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6599-6610.
- FENG Xin, ZHANG Jianwen, ZHOU Jianqiao, et al. Series-shunt multi-port flexible interconnection switch for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6599-6610(in Chinese).
- [7] 葛少云, 杨赞, 刘洪, 等. 含四端 SOP 有源配电网可靠性和供电能力评估[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1124-1132.
- GE Shaoyun, YANG Zan, LIU Hong, et al. Reliability and power supply capability evaluation of active distribution networks with four-terminal soft open points [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1124-1132(in Chinese).
- [8] 王成山, 季节, 冀浩然, 等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 1-14.
- WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1-14(in Chinese).
- [9] RASHAD A, KAMEL S, JURADO F, et al. Optimal design of SSSC and crowbar parameters for performance enhancement of Egyptian Zafrana wind farm[J]. Electrical Engineering, 2022, 104(3): 1441-1457.
- [10] 李群, 张宁宇, 王新宝, 等. 电力潮流灵活控制技术应用综述[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 50-60.
- LI Qun, ZHANG Ningyu, WANG Xinbao, et al. Review on application of flexible power flow control technology [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 50-60(in Chinese).
- [11] 郭祺, 贾文慧, 涂春鸣, 等. 面向暂态电压主动支撑的多功能并网变流器多模式柔性切换策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 156-164.
- GUO Qi, JIA Wenhui, TU Chunming, et al. Multi-mode flexible switching strategy of multi-functional grid-connected converters for active support to transient voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 156-164(in Chinese).
- [12] 余梦泽, 李峰, 李作红, 等. 移相变压器原理、拓扑、应用及发展[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2023, 56(10): 1224-1237.
- YU Mengze, LI Feng, LI Zuohong, et al. Principle, topology, application and development of phase-shifting transformer[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(10): 1224-1237(in Chinese).
- [13] 陈柏超, 康翦冰, 孔婧怡, 等. 配电网电磁式柔性互联装置的快速投切方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 154-161.
- CHEN Baichao, KANG Jianbing, KONG Jingyi, et al. A fast switching method for a distribution electromagnetic soft interconnection device[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 154-161(in Chinese).
- [14] SEN K K, SEN M L. Power flow control solutions for a modern grid using SMART power flow controllers [M]. Hoboken: IEEE Press, 2022: 375-534.
- [15] 蒋昌君, 刘海涛, 熊雄, 等. 面向新型配电系统的柔性互联开关运行控制技术综述[J]. 供用电, 2026, 43(2): 3-13.
- JIANG Changjun, LIU Haitao, XIONG Xiong, et al. A review of operation control technologies of soft open points for new type distribution system[J]. Distribution & Utilization, 2026, 43(2): 3-13(in Chinese).
- [16] 李厚源. UPFC 故障穿越及其接入线路的保护与重合闸技术研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- LI Houyuan. Research on UPFC fault ride-through and its access line protection and reclosure technology [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2023(in Chinese).
- [17] 郑涛, 沈文韬, 吕文轩, 等. 基于智能软开关的柔性互联配网相间短路故障定位方法[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 5118-5128.
- ZHENG Tao, SHEN Wentao, LYU Wenxuan, et al. Fault location method for phase-to-phase short circuit in flexible interconnected distribution network based on SOP [J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 5118-5128(in Chinese).
- [18] 罗韦华, 薛彦哲, 姜佳彦, 等. 一种三电平变流器故障诊断及容错控制策略[J]. 电力电子技术, 2024, 58(8): 16-19.
- LUO Weihua, XUE Yanzhe, JIANG Jiayan, et al. A fault diagnosis and fault-tolerant control strategy for three-level converter[J]. Power Electronics, 2024, 58(8): 16-19(in Chinese).
- [19] SHI Pengchuan, WANG Xueqing, MENG Xin, et al.

- Adaptive fault-tolerant control for open-circuit faults in dual three-phase PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 3676-3688.
- [20] GENG Zhi, YANG Yong, XIAO Yang, et al. A submodule fault-tolerant operation scheme of modular multilevel converters through novel cold and hot mixed topology [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(4): 2470-2481.
- [21] PENG Xing, XIAO Fan, TU Chunming, et al. A fault-tolerant control for hybrid active neutral-point-clamped converters with shared redundant unit under multiswitch open-circuit fault[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(8): 8550-8560.
- [22] 陈新, 姚旭, 康小宁. 双芯对称离散型可控移相器对纵联保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 121-125.
CHEN Xin, YAO Xu, KANG Xiaoning. Research on the effects of TCPS on pilot protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 121-125(in Chinese).
- [23] 郑涛, 于佳旭, 睦程曦, 等. 基于磁路耦合的 Sen 变压器差动保护方案[J]. 中国电力, 2025, 58(3): 108-118.
ZHENG Tao, YU Jiaxu, SUI Chengxi, et al. Sen transformer differential protection scheme based on magnetic circuit coupling[J]. Electric Power, 2025, 58(3): 108-118(in Chinese).
- [24] 郑涛, 申由, 于佳旭, 等. 基于单芯移相变压器的差动保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 59-70.
ZHENG Tao, SHEN You, YU Jiaxu, et al. Differential protection configuration based on a single core phase shifting transformer[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 59-70(in Chinese).
- [25] 陈凯龙, 宋洁莹, 刘欣, 等. “Sen” 变压器(ST)的稳态等效模型研究[J]. 电力建设, 2020, 41(2): 76-84.
CHEN Kailong, SONG Jieying, LIU Xin, et al. Research on steady-state equivalent model of “Sen” transformer (ST)[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(2): 76-84(in Chinese).



王翔

在线出版日期: 2026-04-10。

收稿日期: 2025-10-13。

作者简介:

王翔(1988), 男, 高级工程师, 研究方向为柔性配电网、柔性交直流输配电, apollot9@163.com;

*通信作者: 才志远(1983), 男, 高级工程师, 研究方向为柔性配电网、柔性交直流输配电, caizy1983@163.com;

王思成(2000), 男, 助理工程师, 研究方向为柔性配电网、无线电能传输, wangsicheng@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 吕鲜艳)